

ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

^{1,2}Чернявский А. О., ²Моисеева М. Е.

¹Научно-инженерный центр "Надежность и ресурс больших систем и машин" УрО
РАН, Екатеринбург

²Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский
университет), г. Челябинск, Россия

e-mail: a.o.cher@mail.ru

Аннотация. Расчеты деформирования конструкций на стадии предразрушения и разрушения необходимы по двум причинам. Во-первых, они позволяют перейти от формулировок, удобных специалистам в расчетах на прочность (коэффициент запаса по напряжениям или деформациям), к формулировкам, которые могут быть напрямую использованы эксплуатационниками (запас по нагрузке, перемещениям, длительности эксплуатации). Во-вторых, такие расчеты необходимы для выполнения риск-анализа, требующего расчетного предсказания сценария и последствий аварии. Характеристики материала, необходимые для расчета стадии предразрушения и разрушения, зависят от метода этого расчета и заложенных в него предположений. При использовании МКЭ в геометрически нелинейной постановке таким способом является использование истинной диаграммы деформирования в напряжениях. В работе предложена процедура, которая позволяет восстанавливать истинные диаграммы деформирования только с использованием справочных характеристик материалов. Найденные диаграммы в некоторых случаях заметно отличаются от получаемых с использованием традиционных аппроксимаций (например, Рамберга-Осгуда).

Ключевые слова: прочность, истинная диаграмма деформирования, метод конечных элементов

DESCRIPTION OF STEEL PROPERTIES IN MODELING OF EMERGENCY SITUATIONS

A. Cherniavsky^{1,2}, M. Moiseeva²

¹Scientific and Engineering Center "Reliability and Resource of Large Systems and
Machines" UB RAS, Ekaterinburg

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

e-mail: a.o.cher@mail.ru

Abstract. Calculations of structures behavior at the stage of pre-fracture and fracture are necessary for two reasons. First, they allow us to shift from formulations that are convenient for specialists in strength calculations (the safety factor for stresses or deformations), to formulations that can be directly used by operators (load, displacement, operation time). Secondly, such calculations are necessary to carry out a risk analysis that requires a calculated prediction of the scenario and the consequences of the accident. The material characteristics required for the calculation of the pre-fracture and fracture stage depend on the method of this calculation and the assumptions put into it. When FEM is used in a geometrically nonlinear setting, this method uses the true stress-strain diagram. The proposed procedure allows to restore the true stress-strain diagrams by the reference characteristics of the materials only (yield strength, ultimate strength, elongation, necking). The found diagrams in some cases differ markedly from those obtained with the use of traditional approximations (for example, Ramberg-Osgood).

Key words: strength, true stress-strain diagram, finite element analysis.

1. Введение

Расчетный анализ поведения конструкций в аварийных ситуациях, необходимый для выполнения риск-анализа [1], требует исходных данных, которые отличаются от необходимых для выполняемого традиционными методами анализа работы при штатной (нормальной) эксплуатации. Наиболее очевидным различием является возможность больших пластических деформаций в аварийной ситуации – при требовании исключить или жестко ограничить их при нормальной эксплуатации. Современные пакеты конечно-элементного анализа поведения конструкций [2, 3] позволяют решать высоконелинейные задачи, но, естественно, не содержат необходимых исходных данных о поведении конкретных материалов.

Отметим, что даже в случае рассмотрения только нормальной эксплуатации расчет процесса разрушения необходим для перехода от формулировок, удобных специалистам в расчетах на прочность («коэффициент запаса по напряжениям», «коэффициент запаса по деформациям в опасной точке»), к формулировкам, которые могут быть напрямую использованы эксплуатационниками (запас по нагрузке, перемещениям, длительности эксплуатации).

Характеристики материала, необходимые для расчета стадии предразрушения и разрушения, зависят от метода этого расчета. Например, если рассматриваемым элементом конструкции является стержень с сечением, совпадающим с сечением стандартного образца для испытаний на растяжение, то наилучшей – в смысле удобства применения – характеристикой является предел прочности. Однако если форма и напряженное и состояние детали отличается от формы и напряженного состояния стандартного образца, прямой перенос результатов (путем умножения предела прочности на начальную площадь поперечного сечения) оказывается невозможен. Широко используемый в настоящее время подход основан на предположении о существовании единой зависимости «интенсивность напряжений – интенсивность пластических деформаций», не зависящей от вида напряженного состояния; эта зависимость тем или иным образом восстанавливается по результатам испытаний образцов – см., например, [4–7].

На стадии проектирования информация о свойствах материала обычно ограничена справочными данными, содержащими лишь минимальный набор характеристик – предел прочности, предел текучести, удлинение и поперечное сужение при разрыве. Построение по этим данным требуемой для расчетов диаграммы деформирования является актуальной задачей, важной как для выполнения риск-анализа, так и для определения запасов прочности при нормальной эксплуатации – если эти запасы определяются по предельным нагрузкам.

2. Однократное быстрое деформирование

Зависимость «истинное напряжение – логарифмическая деформация», необходимая для использования в расчетных процедурах типа [2, 3], не может быть напрямую получена из эксперимента хотя бы потому, что при больших пластических деформациях напряженно-деформированное состояние образца «для испытаний на растяжение» не является однородным и линейным. Попытки построения аппроксимаций, подходящих для определенных классов материалов и использующих минимальный набор данных (см.,

например, [5, 6]) не всегда достаточно точны – можно заметить, например, что в соответствующие формулы не входят характеристики пластичности, т.е. пластичность материалов с одинаковой прочностью предполагается одинаковой, что, естественно, не всегда правильно. Более обоснованным представляется подход, описанный в [7], где истинная диаграмма деформирования подбирается путем сравнения компьютерного моделирования растяжения образца заданной формы (и с выбранной диаграммой деформирования) с экспериментом. Единственным недостатком такого подхода является требование наличия экспериментальных диаграмм деформирования, которые не приводятся в стандартных справочниках. Ниже предлагается модификация этого подхода, опирающаяся только на стандартные справочные данные.

Предположим, что поведение материала описывается традиционной системой уравнений, предполагающей разделение деформации на упругую и пластическую и ассоциированный закон течения для пластической деформации:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p, \quad \varepsilon_{ij}^e = C_{ijkl} \sigma_{kl}, \quad d\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial \Phi(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}.$$

Здесь $\boldsymbol{\varepsilon}$, $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ и $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ – тензоры полной, упругой и пластической деформации соответственно, величины с нижними индексами – компоненты тензоров, C – тензор упругих констант, Φ – пластический потенциал, λ – множители Лагранжа. Будем моделировать поведение образца для испытаний на растяжение, закладывая какую-нибудь «истинную» диаграмму деформирования и получая расчетом диаграмму в условных напряжениях, при этом расчет будем вести в геометрически нелинейной постановке – с учетом образования шейки. Начальную форму образца, при отсутствии других данных, будем задавать по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». Истинную диаграмму – или связанный с ней потенциал Φ – будем подбирать таким образом, чтобы отличия найденных условных характеристик (предела прочности, предела текучести, характеристик пластичности) от расчетных были минимальны. Предпочтительно, чтобы описание истинной диаграммы содержало не слишком много параметров – в противном случае процедура минимизации расхождений работает неустойчиво. Предварительные пробы показали, что широко используемое описание Рамберга-Осгуда, содержащее только 2 параметра, является недостаточно гибким, поэтому использовалась модель Джонсона-Кука, которая при постоянной температуре и постоянной (или просто не слишком большой) скорости нагружения описывается соотношением

$$\sigma_T = A + B\varepsilon_p^n,$$

где σ_T – предел текучести; ε_p – интенсивность пластической деформации; A , B , n – константы.

Отметим, что справочные данные не позволяют определить положение даже двух точек на диаграмме условных напряжений, поскольку характеристики пластичности δ и ψ определяются для момента разрыва образца, а не для деформации, соответствующей пределу прочности. Кроме того, модель деформирования (Рамберга-Осгуда, Джонсона-Кука и т.п.) непосредственно не содержит критерия разрушения – деформация может принимать любое значение. Чтобы преодолеть эти трудности, подбор параметров A , B , n выполнялся путем минимизации величины

$$\Delta = \left(\frac{\sigma_B^p}{\sigma_B} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{0.2}^p}{\sigma_{0.2}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\psi^p(\delta)}{\psi} - 1 \right)^2,$$

где σ_B , $\sigma_{0.2}$, δ , ψ – справочные данные для материала, σ^p – расчетные значения соответствующих условных напряжений, $\psi^p(\delta)$ – расчетное поперечное сужение при удлинении, равном справочному удлинению при разрыве.

Примеры результатов моделирования поведения образцов, (условные диаграммы) полученные с использованием подобранных характеристик, показаны на рис. 1. Отметим еще раз, что для подбора истинных диаграмм деформирования использовались не полные экспериментальные условные диаграммы, а только справочные данные.

Подобранные истинные диаграммы деформирования заметно отличаются от определяемых по традиционной методике (рис. 2), что объясняется использованием меньшего набора предположений и повышает точность моделирования.

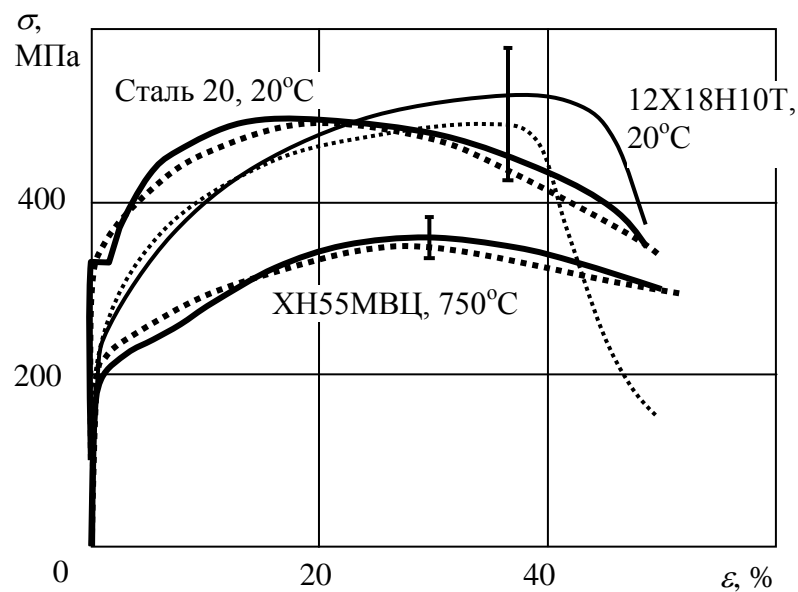


Рис. 1. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые) условные диаграммы деформирования

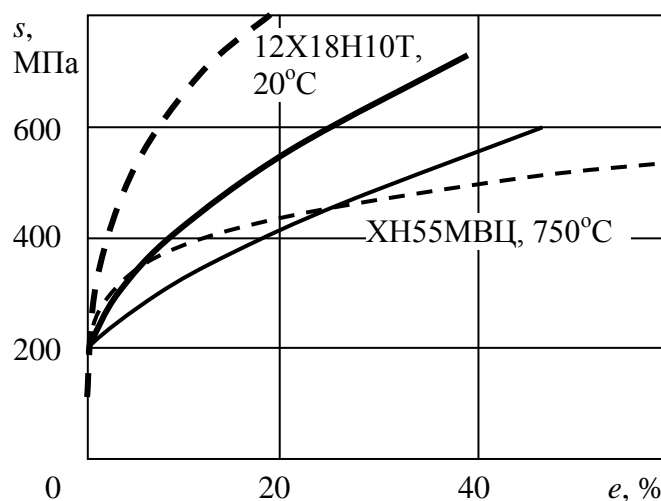


Рис. 2. Диаграммы деформирования материала в координатах «истинное напряжение – логарифмическая деформация», построенные по разным методикам: по Рамбергу-Осгуду (штриховые линии) и предлагаемой (сплошные)

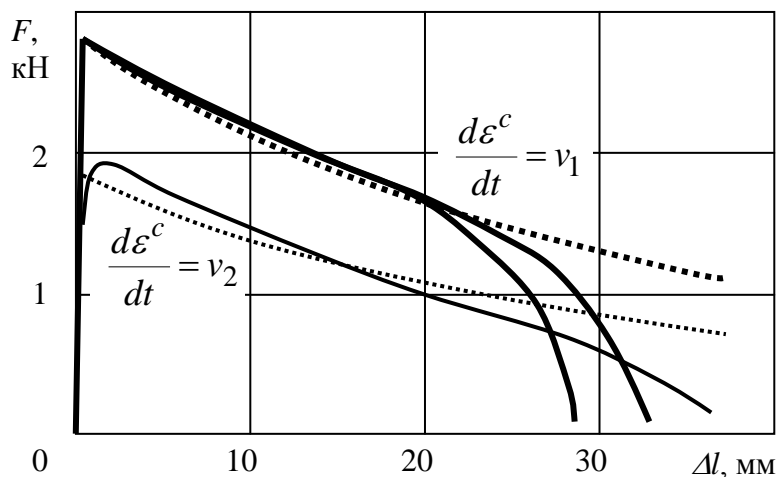


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные диаграммы деформирования образцов в условиях медленного нагружения

3. Влияние длительности нагружения

Аварийные ситуации, связанные с повышением температуры (например, перегрев элементов энергетического оборудования), могут развиваться в течение заметного времени в силу большой тепловой инерции массивных конструкций. Длительность нагружения, отличающаяся от длительности кратковременных испытаний, влияет не только на величины характеристик материала, но и на вид диаграмм. В качестве примера на рис. 3 показаны результаты испытаний стали 09Г2С при повышенной температуре и двух разных скоростях нагружения (испытания выполнены в АО НИКИЭТ им. Н. А. Доллежалея). Влияние скорости может быть учтено через включение в модель ползучести материала.

На первый взгляд, простейшая модель ползучести – так называемая модель Нортона вида

$$\frac{d\varepsilon^c}{dt} = K\sigma^m,$$

(ε^c – интенсивность деформаций ползучести, t – время, σ – интенсивность напряжений, K и m – константы) не согласуется с экспериментом, в котором постоянная скорость нагружения сопровождается падением напряжений. Однако напряжения на рис. 3 являются условными, и учет изменения площади поперечного сечения образца (путем прямого моделирования в конечно-элементном пакете) позволяет достаточно хорошо описать деформирование – за исключением стадии, непосредственно предшествующей разрушению. Добавление в приведенную выше формулу сомножителей, учитывающих ускорение ползучести со временем и/или накопленной деформацией, не исправляет ситуацию. Возможно, причиной отличий является возникающее на последней стадии деформирования нарушение исходной гипотезы о неизменности объема материала при неупругом деформировании – развитие пор в условиях ползучести может приводить к снижению «живого сечения» образца без видимого образования шейки.

Выводы

Способ описания диаграмм деформирования зависит от технологии расчета и заложенных в нее предположений. При использовании МКЭ в геометрически нелинейной постановке таким способом является использование истинной диаграммы

деформирования в напряжениях. Предложенная процедура позволяет восстанавливать истинные диаграммы деформирования по справочным характеристикам материалов. Найденные диаграммы в некоторых случаях заметно отличаются от получаемых с использованием традиционных аппроксимаций (например, Рамберга-Осгуда).

Список литературы

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научнотехнические аспекты. Фундаментальные и прикладные проблемы комплексной безопасности / Науч. рук. Махутов Н.А. – М.: МГОФ «Знание», 2015. 992 с.
2. ANSYS user manual - ANSYS Inc., www.ansys.com
3. LS-DYNA user manual - Livermore Software Technology Corporation, www.lstc.com
4. Фрейтаг В.А. Аналитическая аппроксимация диаграмм растяжения металлов // тр. Ленингр. науч.-исслед. и констр. ин-та хим. машиностроения, 1974, №8, с.204-218
5. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII Rules For Construction Of Pressure Vessels. Division 2 Alternative Rules - New York, NY - ASME, 2015 - 848 pp.
6. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении. Справочник. / Д.А.Гохфельд, Л.Б.Гецов, К.М.Кононов, Е.Т.Кульчихин и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 408 с.
7. Численная модель макровязкого разрушения современных сталей магистральных газопроводов / А.И.Абакумов, И.И.Сафронов, А.С.Смирнов, А.Б.Арабей // Проблемы прочности и пластичности. 2017. Т. 79. № 3. С. 301-311.